

①9 RÉPUBLIQUE FRANÇAISE  
INSTITUT NATIONAL  
DE LA PROPRIÉTÉ INDUSTRIELLE  
PARIS

①1 N° de publication :  
(à n'utiliser que pour les  
commandes de reproduction)

2 731 074

②1 N° d'enregistrement national :

95 02263

⑤1 Int Cl<sup>9</sup> : G 01 N 21/21, H 01 L 21/66

①2

## DEMANDE DE BREVET D'INVENTION

A1

②2 Date de dépôt : 27.02.95.

③0 Priorité :

④3 Date de la mise à disposition du public de la  
demande : 30.08.96 Bulletin 96/35.

⑤6 Liste des documents cités dans le rapport de  
recherche préliminaire : *Se reporter à la fin du  
présent fascicule.*

⑥0 Références à d'autres documents nationaux  
apparentés :

⑦1 Demandeur(s) : INSTRUMENTS SA SOCIETE  
ANONYME — FR.

⑦2 Inventeur(s) : DREVILLON BERNARD, KILDEMO  
MORTEN et BENFERHAT RAMDANE.

⑦3 Titulaire(s) :

⑦4 Mandataire : CABINET HARLE ET PHELIP.

⑤4 PROCÉDE DE MESURE ELLIPSOMETRIQUE, ELLIPSOMETRE ET DISPOSITIF DE CONTRÔLE  
D'ÉLABORATION DE COUCHES LES METTANT EN ŒUVRE.

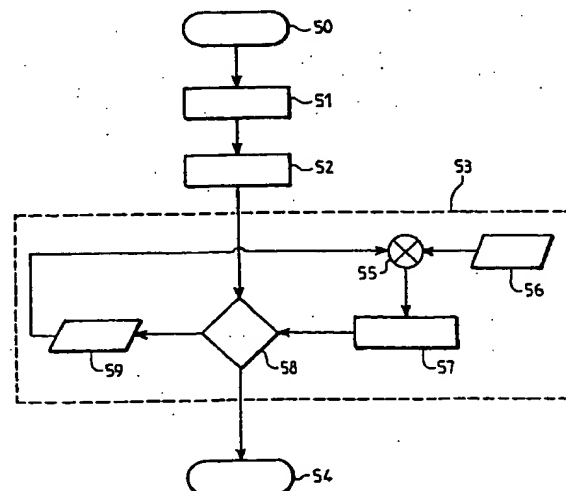
⑤7 La présente invention concerne un procédé et disposi-  
tif de mesure ellipsométrique de paramètres physiques re-  
présentatifs d'un échantillon.

A partir du signal (50) représentatif de l'intensité  $I(t)$  me-  
surée, on calcule (51, 52) des valeurs mesurées  $I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  
 $I_{cm}$ .

Dans une première étape (55, 57), des valeurs théori-  
ques  $I_x/I_x$  et  $I_y/I_x$  initiales à partir d'estimations initiales  
(56) des paramètres physiques. Dans une deuxième étape  
(58, 59), on détermine des estimations suivantes (59) des  
paramètres physiques dont on déduit (55, 57) des valeurs  
théoriques  $I_x/I_x$  et  $I_y/I_x$  suivantes. La deuxième étape est  
réitérée jusqu'à une Nième estimation (59) des paramètres  
physiques, de façon à minimiser l'écart entre les valeurs  
théoriques et celles mesurées.

Les paramètres physiques sont évalués (54) au cours de  
la Nième estimation.

Application à un contrôle d'élaboration de couches sur  
un substrat.



BEST AVAILABLE COPY

FR 2 731 074 - A1



La présente invention concerne un procédé et un appareil d'ellipsométrie rapide, ainsi qu'un dispositif de contrôle d'élaboration de couches les mettant en oeuvre.

L'ellipsométrie est une technique de mesure non destructive  
5 permettant la caractérisation optique d'un échantillon disposant d'une surface spéculaire ou quasi spéculaire.

L'ellipsométrie peut être mise en oeuvre in situ et permet alors l'étude des mécanismes de croissance des couches minces, de formation des interfaces et le contrôle de procédé d'élaboration de ces couches et  
10 interfaces. L'ellipsométrie est, par exemple, utilisée pour l'étude et le contrôle de la fabrication des semi-conducteurs.

Les mesures ellipsométriques peuvent être réalisées à une longueur d'onde fixe, ou à plusieurs longueurs d'onde (ellipsométrie spectroscopique). Selon le domaine de longueur d'onde de la source,  
15 proche ultraviolet, visible, proche infrarouge, infrarouge, etc..., il est possible d'accéder à des propriétés différentes des couches, des matériaux ou d'explorer des matériaux différents.

Dans le domaine de l'ultraviolet et du visible, la profondeur de pénétration du rayonnement est souvent faible. Cela constitue des  
20 conditions favorables pour l'étude des surfaces et des interfaces, et pour les contrôles en temps réel. Cela ne permet généralement pas d'accéder aux propriétés volumiques des couches et des matériaux qui peuvent, au contraire, être obtenues par des mesures dans le domaine de l'infrarouge.

L'infrarouge est bien adapté aux mesures d'absorption  
25 vibrationnelles (liaisons chimiques).

Pour la réalisation des mesures ellipsométriques, la surface d'un échantillon est éclairée par un faisceau lumineux et l'état de polarisation d'un faisceau incident  $i$  est comparé à celui du faisceau réfléchi  $r$  ou transmis. Un vecteur de polarisation  $E$  est généralement représenté par  
30 ses projections  $E_s$  et  $E_p$ , respectivement perpendiculaires et parallèles au plan d'incidence. Les projections  $E_p$  et  $E_s$  sont des amplitudes complexes.

Dans le domaine de l'ellipsométrie, on représente généralement le rapport  $\rho = (E_p/E_s)^r / (E_p/E_s)^i$ , significatif des modifications de l'état de  
35 polarisation produites par la surface étudiée, sous la forme :

$$\rho = \operatorname{tg} \Psi \cdot \exp(i\Delta) = (E_p/E_s)^r / (E_p/E_s)^i$$

Les deux angles  $\Psi$  et  $\Delta$  décrivant le changement de polarisation sont ainsi combinés dans la quantité complexe  $\rho$ .

Les angles  $\Psi$  et  $\Delta$ , donc le nombre  $\rho$ , dépendent à la fois de propriétés de l'échantillon, de l'angle d'incidence d'un faisceau et de la longueur d'onde de mesure. L'expression de  $\Psi$  et  $\Delta$ , ou de  $\rho$ , en fonction de ces paramètres, est donnée par les équations de Fresnel citées, par exemple, par D. CHARLOT et A. MARUANI dans Appl. Opt. 24, 3368, 1985.

10 Dans un ellipsomètre à modulation de phase, un rayon incident a sa polarisation modulée par une différence de phase générée entre deux axes propres d'un modulateur de phase. Le déphasage  $\delta(t)$  évolue typiquement avec le temps  $t$  selon une loi périodique de pulsation  $\omega$ ,  $\delta(t)$  étant proportionnel au premier ordre à  $\sin(\omega t)$ .

15 Dans un ellipsomètre à modulation de phase, l'intensité d'un flux lumineux réfléchi par un échantillon permet de déduire, de façon connue, les valeurs de  $\Psi$  et  $\Delta$ .

L'ellipsométrie, et plus particulièrement l'ellipsométrie spectroscopique à modulation de phase (ESMP), est une technique performante pour mesurer en temps réel la croissance de couches sur un substrat. Cette technique présente l'avantage de ne pas perturber des réactions en cours. Elle est par ailleurs très sensible à des paramètres physiques de l'échantillon mesuré, tels qu'une épaisseur  $d$  de couche et un indice  $n$  de réfraction. D'autre part, elle permet des mesures rapides.

25 Selon un procédé connu, les angles  $\Psi$  et  $\Delta$ , ou  $\rho$ , sont déduits des mesures d'intensité. Ces quantités  $\Psi$  et  $\Delta$  dépendent de paramètres physiques de l'échantillon mesuré, tels que l'indice  $n$  et l'épaisseur  $d$  de la couche supérieure. Ces derniers peuvent ainsi être calculés ensuite à partir de  $\Psi$  et  $\Delta$ , par une inversion directe des équations de Fresnel. Cette inversion doit être en général réalisée de manière itérative.

30 L'application à un diagnostic in situ et à un contrôle de croissance de l'ellipsométrie spectroscopique à modulation de phase est, par exemple, décrite dans le document "High-speed spectral ellipsometry for in situ diagnostics and process control", DUNCAN et al., J. Vac. Sci. Technol. B., 12(4), 1994.

Malgré son efficacité, cette méthode présente l'inconvénient de générer dans certaines circonstances des incertitudes dans les mesures de paramètres physiques. Ces incertitudes peuvent apparaître, en particulier, lors de la croissance d'un matériau transparent sur un substrat absorbant. Elle détériore alors sensiblement la précision des mesures.

L'objet de la présente invention est de pratiquer l'ellipsométrie à modulation de phase en s'affranchissant des problèmes d'oscillations périodiques, et d'améliorer ainsi la précision des mesures.

Un autre but de l'invention consiste à contrôler sans difficulté particulière le dépôt de matériau transparent sur un substrat.

C'est aussi un objectif de l'invention de mesurer des paramètres physiques lors du dépôt d'un film sur un substrat à une vitesse élevée, par exemple supérieure à  $30 \text{ Å s}^{-1}$ , jusqu'à une épaisseur importante, par exemple supérieure à  $4000 \text{ Å}$ , avec une bonne précision.

Un but supplémentaire de l'invention est de mesurer des paramètres physiques d'un échantillon, tels que  $n$  et  $d$ , sans avoir à mesurer les angles  $\Psi$  et  $\Delta$ , ou le nombre  $\rho$ .

A cet effet, l'invention concerne un procédé de mesure ellipsométrique de paramètres physiques représentatifs d'un échantillon.

Dans ce procédé :

- on polarise linéairement un faisceau lumineux incident, ledit faisceau étant défini par un vecteur polarisation,

- on module le faisceau lumineux incident de lumière polarisée de façon à introduire, entre des composantes perpendiculaires du vecteur polarisation, un déphasage  $\delta(t)$  dépendant du temps  $t$  selon une variation périodique de pulsation  $\omega$ ,  $\delta(t)$  étant proportionnel au premier ordre à  $\sin(\omega t)$ ,

- on éclaire l'échantillon avec le faisceau lumineux incident de lumière polarisée modulée,

- on analyse le vecteur polarisation du faisceau lumineux renvoyé par l'échantillon,

- on mesure par au moins un photodétecteur un flux du faisceau lumineux,

- on effectue par une unité de traitement électronique reliée au photodétecteur, des calculs sur des mesures du flux.

Le flux détecté a une intensité  $I(f)$  de la forme :

$$I(f) = I_{om} + I_{sm} \sin \delta(f) + I_{cm} \cos \delta(f),$$

$I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  étant des valeurs mesurées dans l'unité de traitement à partir de l'intensité  $I(f)$ , et dépendant des paramètres physiques.

5 Selon l'invention :

- dans une première étape, on produit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  initiales à partir d'estimations initiales des paramètres physiques,
- les valeurs théoriques servent à déterminer, dans une deuxième étape, les estimations suivantes des paramètres physiques dont on déduit  
10 des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  suivantes,
- la deuxième étape est répétée jusqu'à une Nième estimation des paramètres physiques, de façon à minimiser l'écart entre les valeurs théoriques et celles mesurées.

Les paramètres physiques sont alors évalués à partir des valeurs  
15  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  au cours de la Nième estimation.

Contrairement aux procédés connus, le procédé selon l'invention ne nécessite donc pas la connaissance de  $\Psi$  et  $\Delta$ . La détermination des paramètres physiques est effectuée directement à partir des valeurs mesurées  $I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  à partir de l'intensité  $I(f)$ . Au lieu d'inverser les  
20 équations de Fresnel, on ajuste ainsi les équations donnant les valeurs précédentes en fonction des paramètres physiques, le processus étant dans ce cas aussi itératif.

Au lieu de prendre en compte un unique point, on effectue une moyenne ou une intégration sur un ensemble de points pour les  
25 ajustements. Typiquement, on traite plusieurs dizaines de points à la fois. Ces points sont obtenus pour une série de mesures à des instants successifs, ou à plusieurs longueurs d'onde. L'obtention de points à des instants successifs est de préférence employée pour des mesures cinétiques, et l'obtention de points à différentes longueurs d'onde, pour  
30 des mesures statiques.

En cas d'un dépôt de plusieurs couches successives sur un substrat, une réactualisation de la série de points moyennée est effectuée lors d'un passage à une nouvelle couche.

Cette technique permet d'éviter l'utilisation des valeurs gênantes de  
35  $\Psi$  et  $\Delta$  entraînant des imprécisions des mesures. Ceci advient, en

particulier, lorsque  $\Psi$  est voisin de  $45^\circ$ .

Or, lors du dépôt d'un matériau transparent sur un substrat absorbant, un rayon incident subit de multiples interférences dans la couche transparente. Une couche, même relativement épaisse, n'amortit pas ces interférences, si bien qu'elle n'atténue pas l'influence du substrat par rapport à celle de la couche sur les propriétés de réflexion. Il en résulte que  $\Psi$  et  $\Delta$  ne convergent pas vers un point d'arrivée correspondant aux caractéristiques optiques de la couche, comme c'est le cas pour le dépôt d'un matériau absorbant. Au contraire,  $\Psi$  et  $\Delta$  subissent des variations importantes et périodiques au cours de la croissance.

Ainsi, les méthodes d'inversion des équations de Fresnel divergent-elles pour des épaisseurs d'une couche d'indice  $n$  telles que :

$$d = \frac{k\lambda}{2\sqrt{n^2 - \sin^2 \Phi_0}}$$

15

avec  $k$  entier,  $\Phi_0$  étant l'angle d'incidence d'un faisceau incident et  $\lambda$  la longueur d'onde de mesure.

Les variations importantes de  $\Psi$  et  $\Delta$  lors du dépôt d'un matériau transparent ne permettent pas d'éviter les zones d'instabilité engendrant les imprécisions mentionnées plus haut. En s'affranchissant de calculs de  $\Psi$  et  $\Delta$  et en recourant à une moyenne, il est possible de réduire considérablement ces inconvénients.

D'autre part, il fait gagner une étape dans l'acquisition de données, car  $\Psi$  et  $\Delta$  sont déduits de  $I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  dans les procédés connus.

Un test d'arrêt, en soi connu, est nécessaire pour arrêter les itérations. Il consiste typiquement à comparer les valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  aux valeurs mesurées  $I_{sm}/I_{om}$  et  $I_{cm}/I_{om}$ . Lorsque leur écart devient inférieur à un pourcentage d'erreurs fixé, on arrête les itérations.

D'autre part, les estimations initiales des paramètres physiques ne nécessitent pas une grande précision, les itérations les faisant rapidement converger. De façon connue, il est avantageux de choisir comme estimations initiales, les paramètres physiques précédemment calculés.

Quelques itérations suffisent pour converger vers les paramètres

physiques. Leur évaluation est ainsi très rapide et peut être effectuée avec un micro-ordinateur standard. La détermination de l'épaisseur  $d$  et de l'indice de réfraction  $n$  d'une couche déposée sur un substrat est typiquement effectuée en environ deux secondes avec une précision de l'ordre de 1 % sur le produit  $n \times d$ , avec un micro-ordinateur tel que ceux connus sous la dénomination "PC 486".

Selon un mode de réalisation préféré du procédé de mesure selon l'invention, des premiers moyens de calcul de l'unité de traitement donnent des composantes de Fourier  $S_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$  de l'intensité du flux, respectivement continue, à la pulsation  $\omega$  et à la pulsation  $2\omega$ . Des deuxièmes moyens de calcul permettent de déduire linéairement des composantes  $S_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$ , les valeurs mesurées  $I_{0m}$ ,  $I_{1m}$  et  $I_{2m}$ . On trouvera une description de ces étapes par B. DREVILLON dans "Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials", vol. 27, pp. 1-87, 1993.

Selon un mode d'utilisation préféré de l'invention, l'échantillon comporte au moins une couche transparente éclairée par un faisceau incident.

En effet, le procédé selon l'invention est alors particulièrement avantageux par rapport aux procédés connus, comme on l'a vu précédemment. Le matériau transparent est, par exemple, de la silice, le substrat pouvant être constitué de silicium.

Le procédé selon l'invention est également applicable à des matériaux absorbants.

Selon un mode de réalisation préféré de l'invention, l'écart entre valeurs théoriques et valeurs mesurées est minimisé par une méthode de moindres carrés.

Ce choix des moindres carrés donne l'écart entre les valeurs théoriques et mesurées. Pour minimiser cet écart, on utilise un procédé classique, tel que la méthode de Levenberg-Marquardt.

Selon un mode de réalisation particulièrement avantageux du procédé de mesure, celui-ci est spectroscopique.

Il est ainsi possible de faire varier la longueur d'onde de mesure. Typiquement, une source lumineuse à large spectre émet un faisceau incident, celui-ci est réfléchi par l'échantillon, puis une longueur d'onde du

faisceau réfléchi est sélectionnée grâce à un monochromateur. Un autre moyen de choisir une longueur d'onde donnée consiste à faire varier la longueur d'onde de la source.

Dans des appareils spectroscopiques séquentiels, on sélectionne successivement une longueur d'onde après l'autre. Au lieu de ces dispositifs traditionnels, on peut aussi utiliser des appareils spectroscopiques de type multiplexé. On détecte alors des faisceaux dispersés sur plusieurs photodétecteurs et on effectue un multiplexage électronique de signaux captés. Ces appareils spectroscopiques de type multiplexé permettent ainsi d'effectuer des mesures simultanées avec plusieurs longueurs d'onde.

L'invention concerne également un ellipsomètre comportant :

- une source lumineuse émettant un faisceau lumineux incident,
- un polariseur polarisant linéairement le faisceau lumineux,
- un modulateur de phase générant un déphasage  $\delta(t)$  dépendant au premier ordre du temps  $t$  selon une variation périodique de pulsation  $\omega$ ,  $\delta(t)$  étant proportionnel au premier ordre à  $\sin(\omega t)$ ,
- un analyseur analysant l'état de polarisation du faisceau lumineux renvoyé par un échantillon éclairé par le faisceau lumineux incident de lumière polarisée,
- un photodétecteur mesurant un flux de faisceau lumineux, et
- une unité de traitement électronique reliée au photodétecteur, effectuant des calculs sur des mesures du flux.

Le flux détecté a une intensité  $I(t)$  de la forme :

$$I(t) = I_{om} + I_{sm} \sin \delta(t) + I_{cm} \cos \delta(t),$$

$I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  étant des valeurs mesurées dans l'unité de traitement à partir de l'intensité  $I(t)$ , et dépendant des paramètres physiques.

Dans l'ellipsomètre selon l'invention :

- l'unité de traitement produit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  initiales à partir d'estimations initiales des paramètres physiques,
- les valeurs théoriques servent à déterminer les estimations suivantes des paramètres physiques dont on déduit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  suivantes,
- cette opération est répétée jusqu'à une Nième estimation des paramètres physiques, de façon à minimiser l'écart entre les valeurs



théoriques et celles mesurées.

Les paramètres physiques sont évalués à partir des valeurs  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  au cours de la Nième estimation.

Dans un mode de réalisation préféré de l'ellipsomètre selon  
5 l'invention, celui-ci comporte au moins une fibre de l'ensemble formé par une première et une deuxième fibres optiques, la première fibre optique étant placée entre la source et le polariseur et la deuxième fibre optique étant placée entre l'analyseur et un système de détection comprenant le photodétecteur.

10 En plus du photodétecteur, le système de détection est susceptible de contenir un monochromateur pour des mesures ellipsométriques à une longueur d'onde, ou un spectrographe pour des mesures simultanées à plusieurs longueurs d'onde. Dans le cas d'une émission d'un faisceau laser, le système de détection peut ne contenir que le photodétecteur.

15 L'invention concerne également d'un dispositif de contrôle d'élaboration de couches sur un substrat comportant des moyens de contrôle de paramètres physiques représentatifs de l'élaboration de couches.

Le substrat et les couches constituant un échantillon, ces moyens  
20 de contrôle comprennent :

- une source lumineuse émettant un faisceau lumineux incident,
- un polariseur polarisant linéairement le faisceau lumineux,
- un modulateur de phase générant un déphasage  $\delta(t)$  dépendant du temps  $t$  selon une variation périodique de pulsation  
25  $\omega$ ,  $\delta(t)$  étant proportionnel au premier ordre à  $\sin(\omega t)$ ,
- un analyseur analysant l'état de polarisation du faisceau lumineux renvoyé par un échantillon éclairé par le faisceau lumineux incident de lumière polarisée,
- au moins un photodétecteur mesurant un flux de faisceau  
30 lumineux, et
- une unité de traitement électronique reliée au photodétecteur, effectuant des calculs sur des mesures du flux.

Le flux détecté a une intensité  $I(t)$  de la forme :

$$I(t) = I_{om} + I_{sm} \sin \delta(t) + I_{cm} \cos \delta(t),$$

35  $I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  étant des valeurs mesurées dans l'unité de traitement à

partir de l'intensité  $I(f)$ , et dépendant des paramètres physiques.

Dans le dispositif de contrôle selon l'invention :

- l'unité de traitement produit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  initiales à partir d'estimations initiales des paramètres physiques,

5       - les valeurs théoriques servent à déterminer les estimations suivantes des paramètres physiques dont on déduit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  suivantes,

10       - cette opération est réitérée jusqu'à une Nième estimation des paramètres physiques, de façon à minimiser l'écart entre les valeurs théoriques et celles mesurées.

Les paramètres physiques sont évalués à partir des valeurs  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  au cours de la Nième estimation.

L'élaboration de couches peut consister en un dépôt sur un substrat.

15       Ce dispositif est ainsi particulièrement bien adapté au contrôle de dépôt de couches effectué par des techniques telles que MOCVD (Metalorganic Chemical Vapour Deposition), PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) ou MBE (Molecular Beam Epitaxy).

L'élaboration de couches peut aussi être réalisée par gravure.

20       Des mesures selon l'invention permettent non seulement d'observer des mécanismes de croissance, mais aussi d'effectuer un procédé de contrôle en temps réel, comprenant des contre-réactions. Il est ainsi possible d'agir en temps réel sur les paramètres d'élaboration des couches.

25       Des mesures précises sont ainsi effectuées sans perturber les mécanismes de croissance.

30       Dans le dispositif de contrôle d'élaboration de couches, les couches ayant chacune une épaisseur, un indice de réfraction et une fonction diélectrique, les paramètres physiques comprennent, de préférence, au moins certains d'entre eux.

Dans le dispositif de contrôle selon l'invention, l'élaboration étant un dépôt, le dépôt d'une couche a avantageusement une vitesse supérieure à  $30 \text{ \AA s}^{-1}$ .

35       Pour une telle vitesse, des mesures obtenues avec le dispositif suivant l'invention sont particulièrement précises comparées à des

mesures effectuées avec un dispositif connu, avec une même capacité de calcul.

Un mode de réalisation de l'invention sera décrit en détail, en référence aux dessins annexés, dans lesquels :

- 5       - la Figure 1 est une représentation schématique d'un appareil de mesure ellipsométrique à une longueur d'onde selon l'invention ;
- la Figure 2 est une représentation schématique d'un appareil de mesure ellipsométrique à plusieurs longueurs d'onde selon l'invention ;
- la Figure 3 est une représentation schématique d'un dispositif de
- 10      contrôle d'élaboration de couches sur un substrat selon l'invention ;
- la Figure 4 est un organigramme du procédé de mesures ellipsométriques de paramètres physiques selon l'invention.

L'ellipsomètre à une longueur d'onde, représenté sur la Figure 1, est destiné à la mesure de paramètres physiques d'un échantillon 1. Il

15      comporte un groupe d'excitation 2, un groupe d'analyse 3 et une unité de traitement électronique 4.

Le groupe d'excitation 2 comporte une source lumineuse 20 reliée à un système optique 22 par l'intermédiaire d'une fibre optique 21, le système optique 22 dirigeant un faisceau lumineux émis par la source 20

20      vers l'échantillon 1. Le groupe d'excitation 2 comporte également un polariseur 23 suivi d'un modulateur de phase 24 entre le système optique 22 et l'échantillon 1. Il introduit un déphasage  $\delta(f)$ .

Le groupe d'analyse 3 comporte un analyseur 30 analysant un faisceau réfléchi par l'échantillon 1, suivi d'un système optique 31

25      adressant le faisceau réfléchi sur un monochromateur 33 par l'intermédiaire d'une fibre optique 32. Le monochromateur 33 est relié à un photodétecteur 34 qui transforme l'intensité d'un flux détecté en un signal électrique. Ce signal est représenté par  $I(f)$ .

Ce signal est fourni à l'unité de traitement électronique 4 par le biais

30      d'une connexion 5. L'unité de traitement électronique 4 reçoit également une référence de fréquence et de phase du modulateur de phase 24 par une ligne 35.

En fonctionnement, la source lumineuse 20 émet un faisceau de lumière incidente 10 dans une gamme de longueur d'onde donnée, ce

35      faisceau étant polarisé par le polariseur 23, puis subissant une

modulation par le modulateur de phase 24. Le modulateur de phase 24 consiste typiquement en une barre de silice fondu soumise à une contrainte périodique générée par un transducteur piézo-électrique. On crée ainsi un déphasage  $\delta(t)$  modulé avec le temps  $t$  entre deux axes propres de cette barre. On module ainsi la polarisation de rayons lumineux émergents.

Le faisceau lumineux incident 10 polarisé et modulé devient, après réflexion sur l'échantillon 1, un faisceau réfléchi 11 ayant une amplitude et une phase résultant de propriétés physiques de l'échantillon 1. Ce faisceau réfléchi 11 est analysé dans l'analyseur 30, puis une longueur d'onde  $\lambda$  est sélectionnée par le monochromateur 33. Un flux du faisceau lumineux 11 est mesuré par le photodétecteur 34 qui fournit un signal électrique généré par l'intensité du flux à l'unité de traitement 4.

L'ellipsomètre à plusieurs longueurs d'onde, représenté sur la Figure 2, diffère de l'ellipsomètre à une longueur d'onde de la Figure 1 par le groupe d'analyse 3 et les connexions entre ce dernier et l'unité 4 de traitement électronique.

Au lieu du monochromateur 33 et du photodétecteur 34, le groupe d'analyse 3 comprend un spectrographe 36 et une série de photodétecteurs 37. Chacun des photodétecteurs 37 permet la mesure d'une longueur d'onde et est relié à l'unité 4 par une connexion 6.

L'ellipsomètre à plusieurs longueurs d'onde de la Figure 2 permet ainsi de mesurer simultanément plusieurs longueurs d'onde, un multiplexage pouvant être réalisé dans l'unité 4.

L'ellipsomètre spectroscopique à modulation de phase, représenté sur les Figures 1 ou 2, est avantageusement utilisé dans un dispositif de contrôle d'élaboration de couches sur un substrat, représenté sur la Figure 3. L'échantillon 1 consiste en un substrat sur lequel on fait croître un dépôt par une technique connue. L'échantillon 1 est positionné sur un susceptible 41 et contenu dans une chambre 40. L'appareil de mesure ellipsométrique précédemment décrit est utilisé pour contrôler la croissance de couches sur le substrat. Des fenêtres 44 et 45 sont pratiquées sur des chemins optiques conduisant, respectivement, du groupe d'excitation 2 vers la chambre 40, et de la chambre 40 vers le groupe d'analyse 3.

Un faisceau lumineux incident 10 est ainsi directement conduit à la chambre 40, puis le faisceau réfléchi 11 par l'échantillon 1 est transmis au groupe d'analyse 3.

Par ce moyen, on effectue des mesures in situ qui ne perturbent pas le processus de croissance.

Au lieu d'une croissance de couches, l'élaboration peut consister en une gravure.

Le signal reçu par l'unité de traitement 4, après détection du faisceau réfléchi 11, est ensuite soumis aux opérations qui suivent, schématisées sur la Figure 4.

Tout d'abord, on extrait d'un signal 50 représentatif d'une intensité  $I(t)$  mesurée, des valeurs mesurées  $I_{0m}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  par un procédé en soi connu.  $I_{0m}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$ , connus sous le nom de coefficients de la matrice de Mueller dans le cas d'une réflexion spéculaire, sont reliés à  $I(t)$  par la relation

$$I(t) = I_{0m} + I_{sm} \sin \delta(t) + I_{cm} \cos \delta(t)$$

On calcule, dans une première étape 51, des composantes de Fourier  $S_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$  de l'intensité  $I(t)$ , respectivement continue, à la pulsation  $\omega$  de modulation et à la pulsation  $2\omega$ . On extrait classiquement ces composantes, par exemple par une transformée de Fourier discrète.

On déduit, dans une étape 52, les valeurs mesurées  $I_{0m}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  à partir des composantes  $S_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$  par des relations linéaires connues.

Selon l'invention, il n'est alors pas nécessaire de connaître  $\Psi$  et  $\Delta$ , ou  $\rho$ . On applique directement aux valeurs mesurées  $I_{0m}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$ , un processus itératif 53 qui conduit à une évaluation 54 de paramètres physiques représentatifs de l'échantillon 1.

Ces paramètres physiques consistent typiquement en l'épaisseur  $d$  d'un film déposé sur un substrat, son indice  $n$  de réfraction et sa fonction diélectrique.

Selon le processus itératif 53, on utilise des estimations initiales 56 des paramètres physiques en entrée 55 de paramètres.

On en déduit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  initiales, selon des formules connues. Les valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  s'expriment en effet comme des combinaisons de fonctions trigonométriques de  $\Psi$  et

$\Delta$ . Par ailleurs, les angles  $\Psi$  et  $\Delta$  sont reliés aux paramètres physiques recherchés par les équations de Fresnel. Les valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  sont donc directement exprimables en fonction des paramètres physiques.

- 5 Les valeurs théoriques obtenues dans l'étape 57 sont comparées aux valeurs mesurées  $I_{sm}/I_{om}$  et  $I_{cm}/I_{om}$  déterminées dans l'étape 52. Cette comparaison 58 nécessite de quantifier l'écart entre les valeurs théoriques et mesurées. On utilise pour ce faire une méthode de moindres carrés en soi connue. D'autre part, on effectue une moyenne sur une série  
10 de  $M$  points. En indexant les points de mesure par  $j$ , on obtient classiquement pour le carré de l'écart entre valeurs théoriques et mesurées :

$$\sum_{j=1}^M \left[ \left( \frac{I_{sm}}{I_{om}} \right)_j - \left( \frac{I_{st}}{I_{ot}} \right)_j \right]^2 + \left[ \left( \frac{I_{cm}}{I_{om}} \right)_j - \left( \frac{I_{ct}}{I_{ot}} \right)_j \right]^2$$

15

On peut utiliser une autre méthode d'ajustement que les moindres carrés, telle que le maximum de vraisemblance ou le remplacement des carrés par d'autres puissances.

- L'écart calculé est comparé à un seuil prédéterminé en fonction de  
20 la précision souhaitée. Si l'écart est inférieur au seuil, l'approximation des valeurs mesurées est satisfaisante et les paramètres physiques utilisés pour les calculer donnent l'évaluation 54. Dans le cas contraire, l'erreur est trop importante et une nouvelle itération est nécessaire. La comparaison 58 conduit alors à définir des estimations suivantes 59 des  
25 paramètres physiques. La détermination de ces estimations suivantes relève de méthodes connues permettant de minimiser l'écart, telle que la méthode de Levenberg-Marquardt.

- Ces estimations suivantes 59 sont elles-mêmes utilisées comme  
entrée 55 de paramètres pour calculer des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  
30  $I_{ct}/I_{ot}$  suivantes en réitérant l'étape 57. Ces valeurs théoriques suivantes servent elles-mêmes de base à la comparaison 58 avec les valeurs mesurées  $I_{sm}/I_{om}$  et  $I_{cm}/I_{om}$ .

boucle 59, 55, 57, 58 jusqu'à ce que l'écart obtenu lors de la comparaison 58 soit inférieur au seuil prédéterminé. De la Nième estimation des paramètres physiques associés à ces valeurs théoriques, on déduit alors l'évaluation 54 des paramètres physiques.

- 5 Ce procédé de mesure ellipsométrique selon l'invention affranchit de problèmes posés par la méthode connue reposant sur l'inversion directe des équations de Fresnel, tels que pour des épaisseurs

$$d = \frac{k\lambda}{2\sqrt{n^2 - \sin^2\Phi_0}} \quad \text{et pour } \Psi \text{ proche de } 45^\circ$$

10

D'autre part, ce procédé selon l'invention ne nécessite pas de calculer  $\Psi$  et  $\Delta$ , mais permet d'obtenir plus directement les paramètres physiques recherchés.

- 15 Généralement, trois ou quatre itérations suffisent à obtenir les paramètres, pour chaque mesure. L'utilisation d'un micro-ordinateur "PC 486" permet ainsi de déterminer l'épaisseur  $d$  et l'indice de réfraction  $n$  d'une couche déposée sur un substrat en moins de deux secondes. Typiquement, le procédé selon l'invention permet des mesures avec une précision de 3 % jusqu'à une épaisseur de couche de 5 à 6000 Å, pour  
20 une vitesse de dépôt élevée de l'ordre de 30 Å s<sup>-1</sup>.

La précision de mesure décroît avec l'épaisseur de la couche déposée. D'autre part, le procédé selon l'invention permet d'obtenir une très bonne précision sur le produit  $n \times d$ . Cette précision est de l'ordre de 1 % dans le cas évoqué précédemment.

- 25 Le procédé selon l'invention permet de contrôler l'homogénéité d'une couche déposée sur un substrat en épaisseur et en composition. Il est valable aussi bien pour le dépôt de matériau absorbant que pour celui de matériau transparent. Il permet également le contrôle de l'élaboration de systèmes multicouches comprenant des empilements.

### REVENDECATIONS

1. Procédé de mesure ellipsométrique de paramètres physiques représentatifs d'un échantillon (1) dans lequel :

- on polarise linéairement un faisceau lumineux incident, ledit  
5 faisceau étant défini par un vecteur polarisation,

- on module le faisceau lumineux incident de lumière polarisée de façon à introduire, entre des composantes perpendiculaires du vecteur polarisation, un déphasage  $\delta(t)$  dépendant du temps  $t$  selon une variation périodique de pulsation  $\omega$ ,  $\delta(t)$  étant proportionnel au premier ordre à  $\sin$   
10  $(\omega t)$ ,

- on éclaire l'échantillon (1) avec le faisceau lumineux incident de lumière polarisée modulée,

- on analyse le vecteur polarisation du faisceau lumineux renvoyé par l'échantillon (1),

15 - on mesure par au moins un photodétecteur (34, 37) un flux du faisceau lumineux,

- on effectue par une unité de traitement électronique (4) reliée au photodétecteur (34, 37), des calculs sur des mesures du flux,

le flux détecté ayant une intensité  $I(t)$  de la forme :

20 
$$I(t) = I_{om} + I_{sm} \sin \delta(t) + I_{cm} \cos \delta(t),$$

$I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  étant des valeurs mesurées dans l'unité de traitement (4) à partir de l'intensité  $I(t)$ , et dépendant desdits paramètres physiques,

caractérisé en ce que :

- dans une première étape, on produit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  initiales à partir d'estimations initiales des paramètres physiques,  
25

- lesdites valeurs théoriques servant à déterminer, dans une deuxième étape, des estimations suivantes des paramètres physiques dont on déduit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  suivantes,

- la deuxième étape étant réitérée jusqu'à une Nième estimation  
30 des paramètres physiques, de façon à minimiser l'écart entre les valeurs théoriques et celles mesurées,

les paramètres physiques étant évalués à partir des valeurs  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  au cours de la Nième estimation.

2. Procédé de mesure selon la revendication 1, caractérisé en ce  
35 que :



des premiers moyens de calcul de l'unité de traitement (4) donnent des composantes de Fourier  $S_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$  de ladite intensité du flux, respectivement continue, à la pulsation  $\omega$  et à la pulsation  $2\omega$ ,

des deuxièmes moyens de calcul permettant de déduire  
5 linéairement des composantes  $S_0$ ,  $S_1$  et  $S_2$  les valeurs mesurées  $I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$ .

3. Procédé selon l'une des revendications 1 ou 2, caractérisé en ce que l'échantillon (1) comporte au moins une couche transparente éclairée par un faisceau incident.

10 4. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que ledit écart entre valeurs théoriques et valeurs mesurées est minimisé par une méthode de moindres carrés.

5. Procédé selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisé en ce que le procédé de mesure est spectroscopique.

15 6. Ellipsomètre comportant :

- une source lumineuse (1) émettant un faisceau lumineux incident,
- un polariseur (23) polarisant linéairement le faisceau lumineux,
- un modulateur de phase (24) générant un déphasage  $\delta(t)$  dépendant au premier ordre du temps  $t$  selon une variation périodique de  
20 pulsation  $\omega$ ,  $\delta(t)$  étant proportionnel au premier ordre à  $\sin(\omega t)$ ,
- un analyseur (30) analysant l'état de polarisation du faisceau lumineux renvoyé par un échantillon éclairé par le faisceau lumineux incident de lumière polarisée,
- au moins un photodétecteur (34, 37) mesurant un flux de faisceau  
25 lumineux, et

- une unité de traitement électronique (4) reliée au photodétecteur (34, 37), effectuant des calculs sur des mesures du flux,

le flux détecté ayant une intensité  $I(t)$  de la forme :

$$I(t) = I_{om} + I_{sm} \sin \delta(t) + I_{cm} \cos \delta(t),$$

30  $I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  étant des valeurs mesurées dans l'unité de traitement (4) à partir de l'intensité  $I(t)$ , et dépendant des paramètres physiques,

caractérisé en ce que :

- l'unité de traitement produit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  initiales à partir d'estimations initiales des paramètres physiques,
- 35 - lesdites valeurs théoriques servant à déterminer des estimations

suivantes des paramètres physiques dont on déduit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  suivantes,

- cette opération étant réitérée jusqu'à une Nième estimation des paramètres physiques, de façon à minimiser l'écart entre les valeurs  
5 théoriques et celles mesurées,

les paramètres physiques étant évalués à partir des valeurs  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  au cours de la Nième estimation.

7. Ellipsomètre selon la revendication 6 caractérisé en ce qu'il comporte au moins une fibre de l'ensemble formé par une première et une  
10 deuxième fibres optiques, la première fibre optique étant placée entre la source et le polariseur et la deuxième fibre optique étant placée entre l'analyseur et un système de détection comprenant le photodétecteur.

8. Dispositif de contrôle d'élaboration de couches comportant des moyens de contrôle de paramètres physiques représentatifs de  
15 l'élaboration de couches, le substrat et les couches constituant un échantillon (1), lesdits moyens de contrôle comprenant :

- une source lumineuse (1) émettant un faisceau lumineux incident,
- un polariseur (23) polarisant linéairement le faisceau lumineux,
- un modulateur de phase (24) générant un déphasage  $\delta(f)$   
20 dépendant au premier ordre du temps  $t$  selon une variation périodique de pulsation  $\omega$ ,  $\delta(f)$  étant proportionnel au premier ordre à  $\sin(\omega f)$ ,
- un analyseur (30) analysant l'état de polarisation du faisceau lumineux renvoyé par l'échantillon éclairé par le faisceau lumineux incident de lumière polarisée,
- au moins un photodétecteur (34, 37) mesurant un flux de faisceau  
25 lumineux, et
- une unité de traitement électronique (4) reliée au photodétecteur (34, 37), effectuant des calculs sur des mesures du flux, le flux détecté ayant une intensité  $I(f)$  de la forme :

30 
$$I(f) = I_{om} + I_{sm} \sin \delta(f) + I_{cm} \cos \delta(f),$$

$I_{om}$ ,  $I_{sm}$ , et  $I_{cm}$  étant des valeurs mesurées dans l'unité de traitement (4) à partir de l'intensité  $I(f)$ , et dépendant des paramètres physiques, caractérisé en ce que :

- l'unité de traitement produit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$   
35 initiales à partir d'estimations initiales des paramètres physiques,

- lesdites valeurs théoriques servant à déterminer des estimations suivantes des paramètres physiques dont on déduit des valeurs théoriques  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  suivantes,

5 - cette opération étant réitérée jusqu'à une Nième estimation des paramètres physiques, de façon à minimiser l'écart entre les valeurs théoriques et celles mesurées,

les paramètres physiques étant évalués à partir des valeurs  $I_{st}/I_{ot}$  et  $I_{ct}/I_{ot}$  au cours de la Nième estimation.

9. Dispositif selon l'une des revendications 7 ou 8, caractérisé en ce  
10 que les couches ont chacune une épaisseur, un indice de réfraction et une fonction diélectrique, les paramètres physiques comprenant au moins certains d'entre eux.

10. Dispositif selon l'une quelconque des revendications 7 à 9, caractérisé en ce que, l'élaboration étant un dépôt, le dépôt d'une couche  
15 a une vitesse supérieure à  $30 \text{ \AA s}^{-1}$ .

1/2

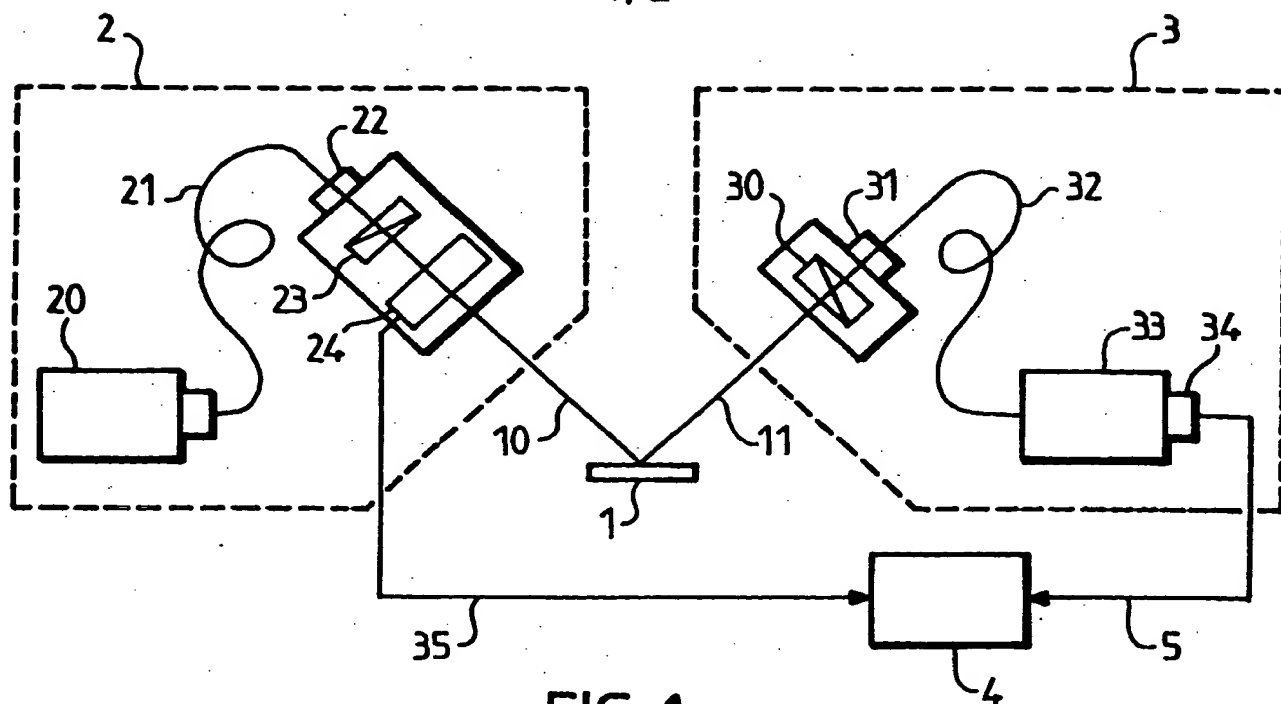


FIG. 1

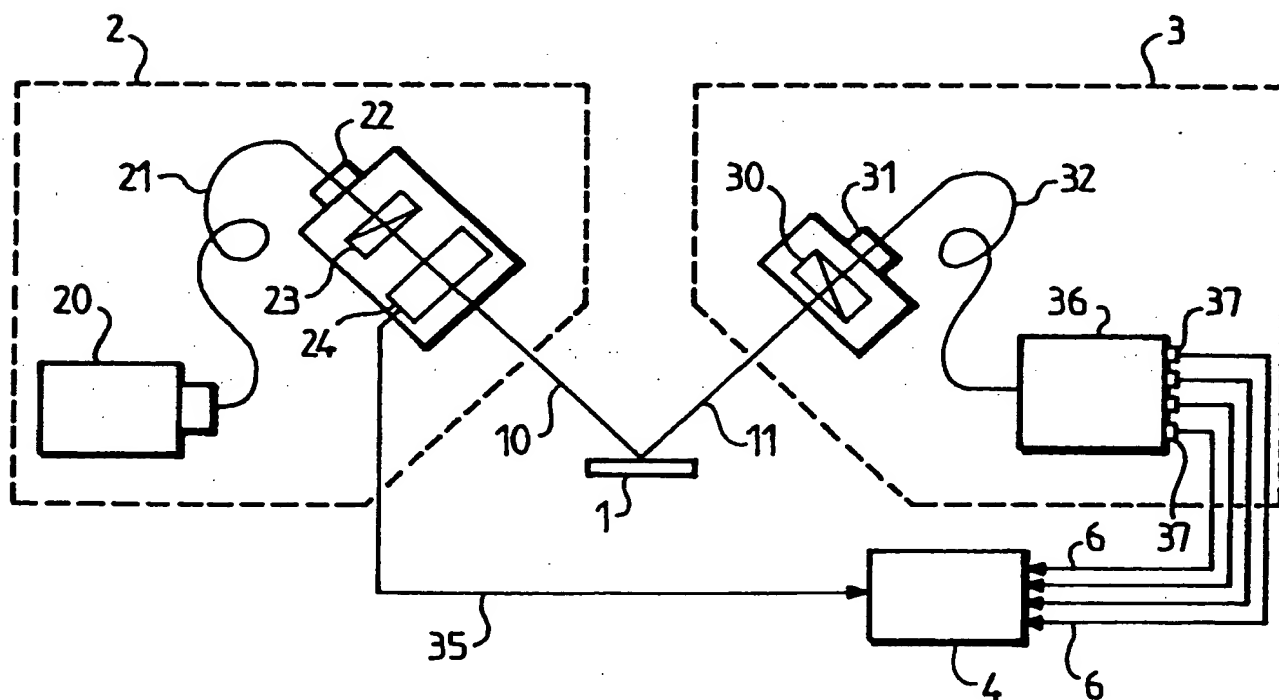
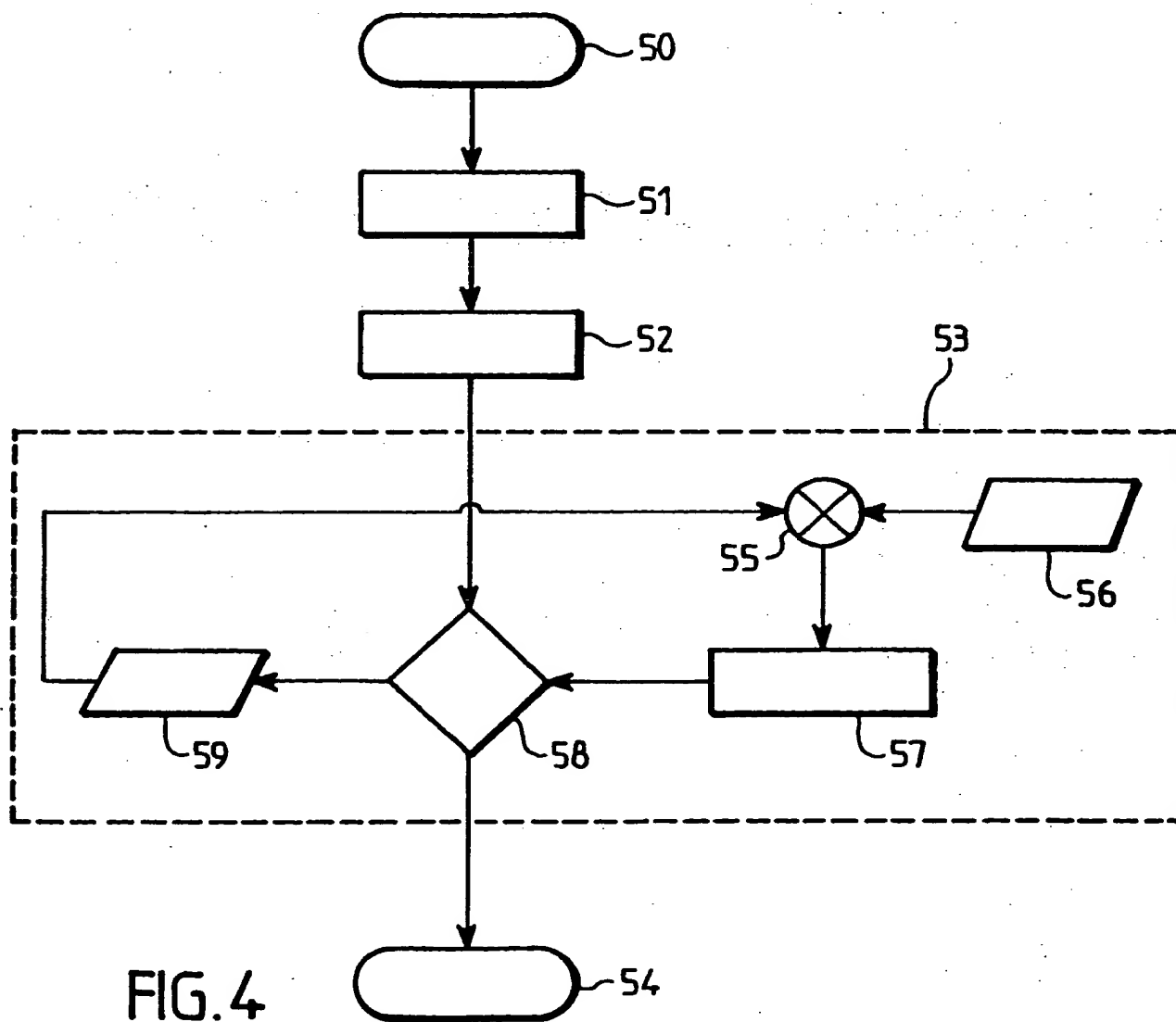
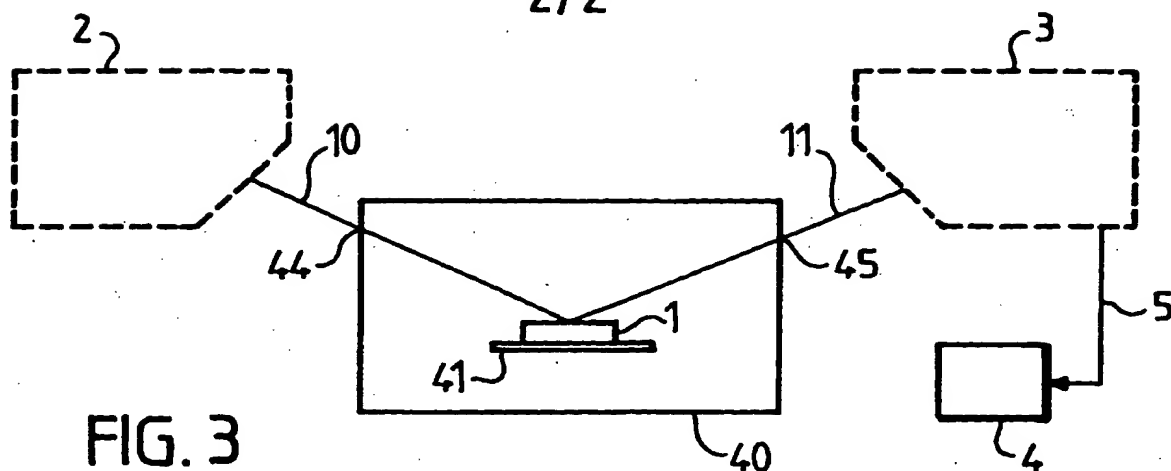


FIG. 2

2/2



INSTITUT NATIONAL  
de la  
PROPRIETE INDUSTRIELLE

**RAPPORT DE RECHERCHE  
PRELIMINAIRE**  
établi sur la base des dernières revendications  
déposées avant le commencement de la recherche

N° d'enregistrement  
national

FA 515745  
FR 9502263

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS		Revendications concernées de la demande examinée
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	
A	JOURNAL OF VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY: PART A, vol.11, no.4, Juillet 1993, NEW YORK US pages 976 - 980 F.K.URBAN III ET AL. 'virtual interface method for in situ ellipsometry of films grown on unknown substrates' * page 977, colonne 1, alinéa 5 - page 978, colonne 1, alinéa 1 *	1,6
A	JOURNAL OF VACUUM SCIENCE AND TECHNOLOGY: PART A, vol.11, no.4, Juillet 1993, NEW YORK US pages 1179 - 1185 S.A. HENCK 'in situ spectral ellipsometry for real-time thickness measurement: etching multilayer stacks' * page 977, colonne 1, alinéa 5 - page 978, colonne 1, alinéa 1 *	1,6
A	REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol.65, no.9, Septembre 1994, NEW YORK US pages 2882 - 2889 A. FRIEDL ET AL. 'in situ characterization of plasma-deposited a-C:H thin films by spectroscopic infrared ellipsometry' * page 2885, colonne 1 - colonne 2, alinéa 1 *	1,6
A	REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS, vol.63, no.11, Novembre 1992, NEW YORK US pages 5332 - 5339 O. ACHER ET AL. 'a reflectance anisotropy spectrometer for real-time measurements' * page 5334, colonne 1 *	1,6
		DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. CL.6)
		G01N G01B
Date d'achèvement de la recherche		Examinateur
28 Novembre 1995		Zinngrebe, U
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES		
<p>X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : pertinent à l'encontre d'un ou de plusieurs revendications ou arrière-plan technologique général O : divulgation non écrite P : document intercalaire</p> <p>T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet bénéficiant d'une date antérieure à la date de dépôt et qui n'a été publié qu'à cette date de dépôt ou qu'à une date postérieure. D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons &amp; : membre de la même famille, document correspondant</p>		

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ BLACK BORDERS
- ☐ IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- ☒ FADED TEXT OR DRAWING
- ☒ BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING
- ☐ SKEWED/SLANTED IMAGES
- ☐ COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS
- ☐ GRAY SCALE DOCUMENTS
- ☐ LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT
- ☐ REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY
- ☐ OTHER: \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**